

しらす地盤地帯における地下水下のトンネル工事

Tunneling Under the Groundwater Table in a Pumice Soil "Shirasu" Deposit

つゆ 露 木 とし 利 さい 貞* よし 吉 だ 田 さぶ 三 ろう 郎**
は 羽 だ 田 ひこ 彦*** まつ 松 ゆき 雪 きよ 清 と 人****

1. はじめに

鹿児島県および宮崎県を中心とする南九州地方には、しらすと呼ばれる第四紀火砕流（軽石流）堆積物^{注1)}が台地をつくって広く分布する（図-1¹⁾）。このしらすは、軽石礫を混入する火山灰質砂礫よりなる未固結層であるが、土粒子の比重が小さく（ $G_s=2.3\sim2.4$ ）、水による侵食等に対して極めて弱いという特性を有している。そのため、豪雨時に斜面崩壊等の大規模な災害が多発し、多くの人命・財産が失われてきた。一方、トンネル工事としらすとの関係について見た場合、従来はほとんどが地下水位より上での工事であったため、このしらすの特性は問題とならず、むしろ、しらすのもつインターロッキング効果や溶結効果に起因する自立性の良さから、しらすトンネルの掘削は比較的容易であるというような見方すらあるのが現状であっ

た。

ところが、最近のしらすトンネルでは、住宅密集地下を薄い土被りで通過する、あるいは今回報告するような地下水位下で掘削するというように、従来とは異なった厳しい条件下での施工が増えつつある。とりわけ、地下水位下のしらすを掘削対象としたトンネル工事例は極めて少なく、その際の問題点の内容、それに対応した適切な地下水対策や掘削工法についての知見はほとんど得られていないのが実情であった。また、これらの事を検討するうえで重要となる一次しらす^{注2)}の侵食特性についての土質力学的メカニズムも、今のところ未解明で研究の遅れている分野であった。

ここでは、鹿児島県内において施工あるいは計画されている地下水位下のしらす層を掘削対象とした2本のトンネル（指宿有料道路山田トンネル、肝属川鹿屋分水路トンネル）において直面した問題点の内容やそれに伴って実施された調査、試験、解析結果、対策工法等について報告する。

2. 山田トンネル

2.1 トンネルの概要

山田トンネルは、指宿有料道路の山田インターチェンジの北側付近にあるしらす台地を造成開発した大規模住宅団地の地下を、最大土被り約40mで南北に貫く延長293mのトンネルである。施工は、昭和59年1月に上部半断面先進工法について開始されたが、上部半断面掘削の際、その底面付近から地下水が湧出し、トラフィカビリティーの著しい低下のため、ダンプトラックによるずり搬出が困難となった。そこで種々の地下水対策工について比較検討し、ウエルポイント工法により地下水位を低下させることとした。併せて、ウエルポイントを撤去した後の地下水上昇時における側壁部でのパイピング、揚圧力による舗装面の破壊等について検討し、いくつかの点で設計変更を行った。

2.2 トンネル部の地質

本トンネルは、比較的開析が進み、やせ屋根状に残った標高85～95mの台地下を貫く形で計画されている。この台

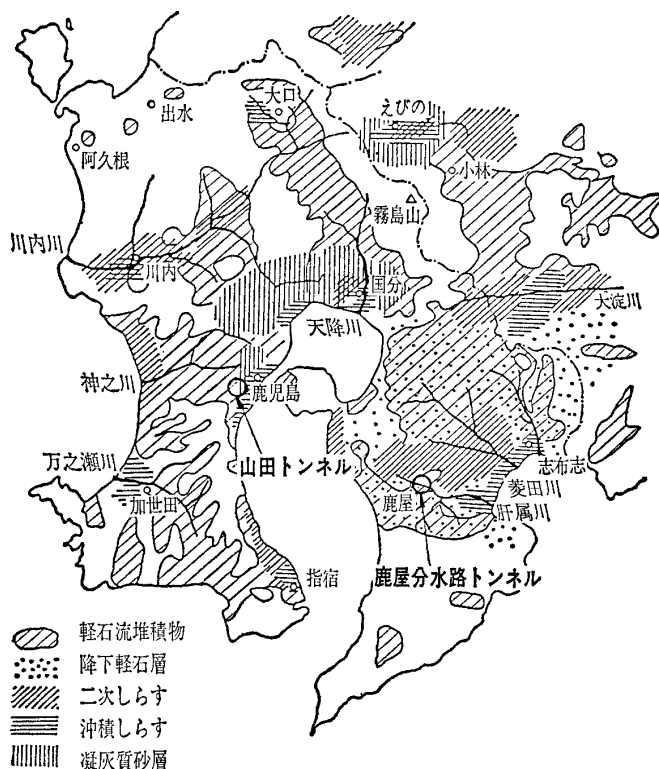


図-1 しらすの分布地域（露木による）¹⁾

*鹿児島大学教授 理学部地学科

**建設省九州地方建設局大隅工事事務所長

***鹿児島県道路公社 建設部長

****基礎地盤コンサルタンツ(株) 福岡支社技術課長

注 1) 火砕流のうち軽石を主にするものを軽石流とする。

注 2) 一次しらすは、軽石流堆積物の非溶結部に対して用いられる呼称であり、地山しらすとも言う。二次しらすは、軽石流堆積層や降下軽石層が再堆積したもので、溶結組織の有無が両者の大きな違いとなっている。

表-1 山田トンネルしらすの物性値

項 目	物 性 値
透 水 係 数	$k=2.80 \times 10^{-8} \text{ cm/s}$
湿 潤 単 位 体 積 重 量	$\gamma_t=1.217 \text{ gf/cm}^3$
間 隙 比	$e=1.249$
土 粒 子 の 比 重	$G=2.380$

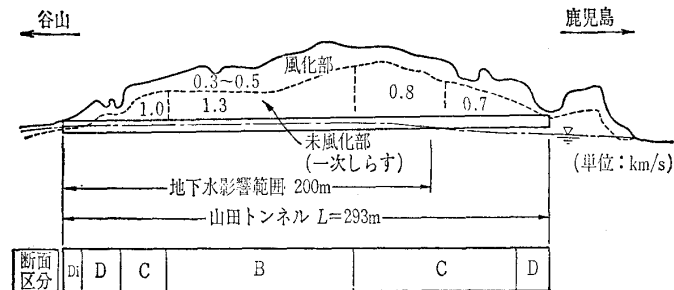


図-2 山田トンネル地質縦断面図

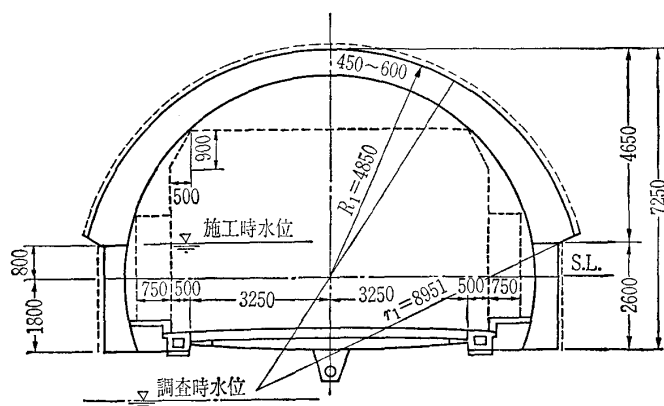


図-3 山田トンネル標準断面図

地は、第四紀更新世に始良カルデラから噴出した(軽石流)堆積物(しらす)から構成されており、トンネル部には、図-2に示すとおり概ね硬質と評価される一次しらすが分布する。しらすの物性値を表-1に、またトンネルの標準断面図を図-3に示す。

2.3 地下水対策工法の検討

(1) 湧水の原因について

前述したように、本トンネルでは上半部底面付近より湧水が生じ施工が困難となった。事前の地質調査段階における地下水位は、施工基面下1~2m付近に位置しており、施工時の地下水位は当時に比べ約3.5~4.5m上昇している。この上昇の原因として、断層破碎帯からの湧水、被圧地下水の湧出等も考えられたが、施工時に弱線部と思われる地層や、地下水を被圧させ得るような難透水層が見当たらなかったこと等から、しらす台地においてしばしば認められる自由地下水面の季節的変動、即ち豊水期の水位上昇によるものと判断した。このことは、地下水面に近接したトンネルにおいては、事前の長期的な地下水位観測が重要であることを示しているといえよう。

(2) 地下水対策工

本トンネルにおいては、何らかの地下水対策工を併用しなければ、上半部掘削時のずり出しが困難であるのみなら

ず、大背や土平部の掘削も地山の自立性の点から極めて困難であった。そのため、釜揚げ排水工法、集水井、ディープウェル工法、ウェルポイント工法等の地下水低下工法について比較・検討を行った。釜揚げ排水工法および集水井については、地下水位低下の所要時間が長く、かつ広範囲の水位低下が望めず、さらにはのり面や壁面が崩壊しやすいため地山を傷める可能性が強いと考えられた。ディープウェル工法は、地表からの打設となり、またしらすの特性から1本の井戸による広範囲の水位低下が困難で、多数の井戸が必要となる。したがって、本トンネルでは、坑内からの打設および短時間での地下水位低下が可能で、かつ確実性や経済性にも優っているウェルポイント工法を採用した。ウェルポイントは、200mの区間において $L=5.0\text{m}$ の深さで、2mピッチに打設した。

2.4 浸透流による問題点の検討

本トンネルでは、側壁裏側の裏面排水管、縦横フィルターマットおよびトンネル底盤の中央排水溝によって、トンネル完成後も地下水を排水することになっている。しかし、実際には地下水位が所期の高さ(裏面排水管の設置高さ)まで低下しないことが考えられたため、側壁下部を通してトンネル内に流入する浸透水によるボイリング(パイピング)、また、浸透水を舗装面等によって遮水したときの揚圧力による舗装面等の破壊(ヒービング)についての検討を行った。

(1) ボイリングの検討

i) 側壁部で生じる動水勾配

トンネル完成後の側壁裏側の水位は、裏面排水管の設置高さの2倍、即ち、側壁底面+0.8mまで上昇すると仮定すると、最も危険な路側部施工時(トンネル内水位=側壁底面)の動水勾配は、側壁幅が0.85mであるので $i=0.94$ となる。

ii) しらすの限界動水勾配

一般に土の限界動水勾配は下式によって求められる。

$$ic = \frac{G-1}{1+e}$$

本トンネルのしらすの土粒子の比重 $G=2.38$ 、間隙比 $e=1.25$ を用いると、限界動水勾配は $ic=0.61$ となる。

iii) 検討結果

以上のように、側壁下部に生じる動水勾配($i=0.94$)はしらすの物理的性質から推定される限界動水勾配($ic=0.61$)よりも大きく、ボイリングの発生する危険性が大きいと判断された。ボイリングを防止するために必要な流路長を逆算すると、

$$L = \frac{H}{i} = \frac{0.8}{0.61} = 1.31(\text{m})$$

となる。そこで本トンネルでは、施工性および安全性を考慮して、図-4に示す範囲に捨てコンクリート(厚さ10cm)を打設することとした。

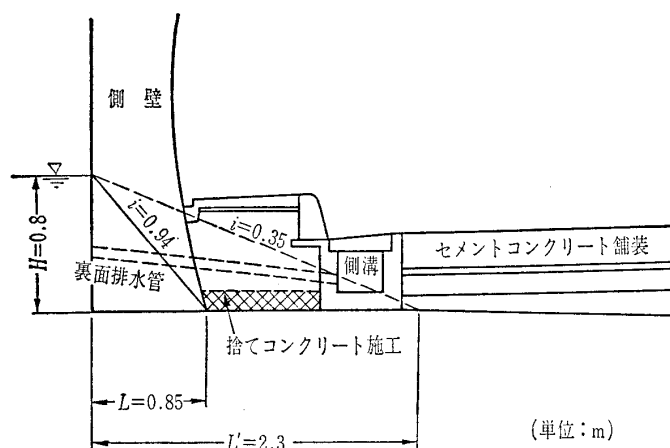


図-4 捨てコンクリート打設位置図

(2) 舗装面の揚圧力による破壊の検討

コンクリート舗装および路側部の捨てコンクリートを打設すると、これらには最大 $0.3 \sim 0.5 \text{ tf/m}^2$ の揚圧力が作用することとなる。実際には、中央排水溝が敷設されているため、揚圧力はより小さいと考えられるが、ここでは安全側に考えてこの値を用い検討を行った。検討の結果、この揚圧力に対しては $F_s=1.35$ 以上の安全率が確保され、問題は少ないと判断した。

2.5 施工の手順

地下水の存在が確認された下半部の掘削は、以下の手順にて行った(図-5)。

- ① ウェルポイントを2mピッチに打設する。
- ② ウェルポイントを稼働しながら大背掘削を行う。その時の水位は、トンネル底面下まで低下している。
- ③ 土平部掘削および側壁コンクリート打設を行う。
- ④ 中央排水溝を掘削し、有孔管($\phi 300 \text{ mm}$)を設置する。この排水溝により、水位は排水溝底面まで低下する。
- ⑤ 中央排水溝上面に土砂吸出し防止用のサンドマット

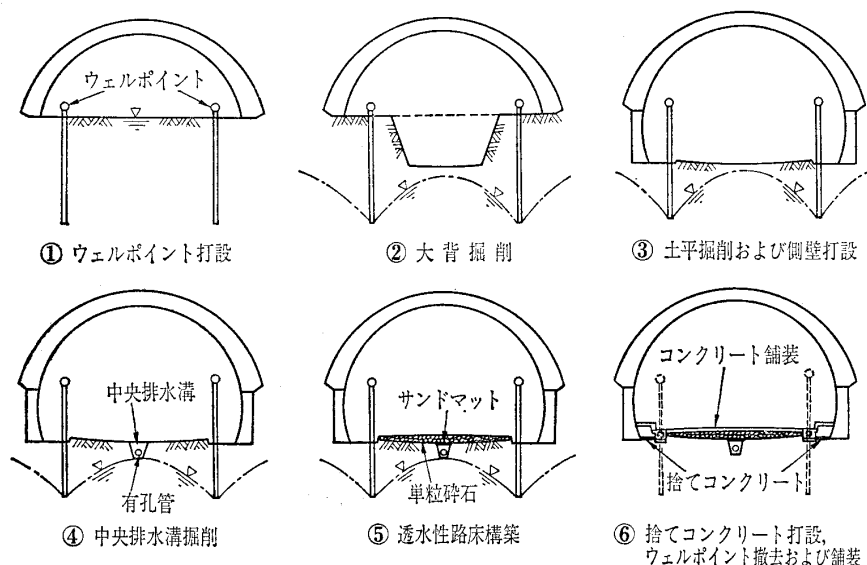


図-5 山田トンネル施工順序概要図

を布設し、中央排水管への地下水の導水を有効に行うため単粒砕石にて厚さ 25 cm の透水性路床工を構築する。さらに路床面にもサンドマットを布設する。

- ⑥ 側壁と側溝の間に不透層として捨てコンクリートを打設しながらウェルポイントを撤去する。その後、碎石路盤構築、アスファルト舗装(厚さ 25 cm)を行い終了する。

本施工では、以上の作業を片側 $5 \sim 10 \text{ m}$ の区間毎に繰り返して行い、全線が無事に完成させた。本トンネルは、施工が完了して約3年経過しているが、透水性路床による中央排水管への地下水の導水が有効になされ、現在毎分 20 l の排水が確認されている。また、トンネル本体の沈下や変形等の異常も皆無である。

3. 鹿屋分水路トンネル

3.1 トンネルの概要

鹿屋分水路が建設されている肝属川は、鹿児島県大隅半島のほぼ中央部を横断して東流する、幹線流路延長 34 km の一級河川である。本川は、主に南九州地方特有のしらす台地中を貫流する河川で、その中流域に位置する鹿屋市においては、市街地の中心部を流下している。ところが市街地中の本川は、計画高水流量の約半分程度の流下能力しかないため、分水路によってその不足分を市街地上流部で分流し、洪水を防止する計画となっている。

鹿屋分水路は、開水路およびトンネルよりなる総延長 2639 m の施設であるが、そのうちトンネルが 1609 m と最も長くなっている。このトンネルは、標高 $50 \sim 60 \text{ m}$ のしらす台地(笠野原台地)下を貫通する大断面トンネル(断面積約 100 m^2)で、全線にわたって地下水位下のしらすを掘削対象とすることとなる。さらに、一部区間においては、しらす下位に存在する高透水性で極めて豊富な滞水層である降下軽石層に近接した施工となる。このように本トンネルは、地下水位下のしらすや降下軽石層を対象とした土木工学的にも未経験、かつ問題の多い工事であり、これまでの地下水のないしらすトンネルとは異なることが予想されたため、さまざまな観点から検討を行ってきた。

3.2 トンネル部の地質

分水路トンネルが建設されている笠野原台地には、第四紀洪積世に噴出した火砕流堆積物や降下軽石層が主に分布する。これらは、下位より阿多カルデラの噴出物と考えられる阿多火砕流堆積物、始良カルデラの噴出物と考えられる大隅降下軽石層と大隅軽石流堆積物^{注3)}に大別される。阿多火砕流は主として溶結凝灰岩よりなり、その上面は、大隅降下軽石層堆積以前の河川の侵食によって、極めて

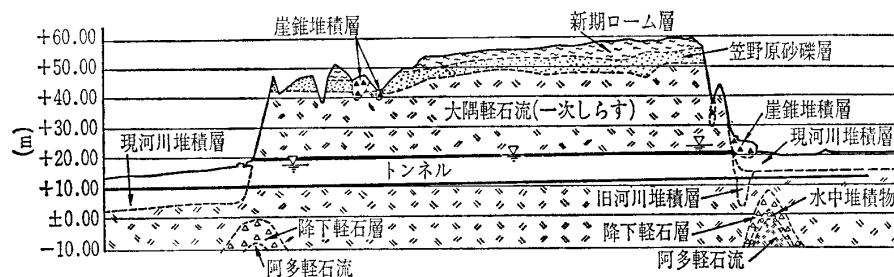


図-6 鹿屋分水路トンネル地質縦断面図

起伏に富んだものとなっている。したがって本層の上位には、河川による堆積層が不規則に分布する。大間降下軽石層は、通称ばら層と呼ばれるもので、層厚3～10m程度で、台地全域に複雑な起伏を有して分布する。本層は、 $\phi 2 \sim 50$ mmの軽石礫層で間隙が大きく、当地域での豊富かつ優れた滞水層となっている。

大間降下軽石層は、いわゆるしらす層で、 $\phi 30 \sim 50$ mmの軽石礫を含んだ火山灰質砂礫よりなり、30m以上の層厚で台地の主体を構成する。

図-6に、トンネル部の地質縦断面図を示す。トンネルは全線にわたってしらす層中に計画されているが、一部の区間では、降下軽石層に近接した形となる。自由地下水面は、トンネルの天端付近に位置している。

3.3 設計・施工上の問題点と対策

地下水位以下のしらすを対象とした鹿屋分水路トンネルの施工法検討に際して特に問題となったのは、「降下軽石層に関連しての内部侵食」、「地下水対策工法」、「トンネル完成後の地下水流動と内部侵食」の3点である。これらは、いずれも地下水位下のしらすトンネルにおける特異な問題であるが、特に降下軽石層に関係した内部侵食問題については、本トンネルの成否を左右するほどの大きい問題となった。以下、各問題点の詳細と対策について述べる。

(1) 降下軽石層に関連しての内部侵食問題

本トンネルは、地下水位下のしらす層を掘削するのみならず、高透水性（透水係数 $k=1.0 \times 10^{-1}$ cm/s）の降下軽石層に近接しての施工となる。トンネルが降下軽石層に遭遇、あるいは近接している場合、地下水が多量に湧出するため、ウェルポイント等による地下水低下が極めて困難である。また、地下水の急速かつ多量の排水に伴って、降下軽石層中にしらすの限界流速以上の地下水流が生じ、しらすが内部侵食を受けるといった問題がある。

この現象は、室内実験²⁾においても確認されているが、鹿屋分水路の実際の開削工事においても、しらすの内部侵食による地盤陥没を経験し多くの知見を得た。この工事は、25m×33mの方形に鋼矢板を建て込み、その締切り内を約10mの深さで掘削する予定であった。ところが、深さ約9

m（地下水位低下量約7m）の掘削時点で、締切り部より約15m離れた民家の床下で直径約10m、深さ約5mの地盤陥没が発生した。図-7の地質断面図に示すように掘削は降下軽石層に近接して施工されており、陥没孔に近い矢板は、ほぼ降下軽石層に達する深さまで根入れされていることが判明した。

以上のような地盤状況や、陥没時に締切り内水位が約3m上昇したこと、矢板沿いに土砂が噴出した形跡が見られたこと等から、この陥没は締切り内水位低下によって矢板沿いにボーリングが発生し、その進行に伴って降下軽石層中にしらすの限界流速以上の地下水流が生じたため、しらすが内部侵食を受けて発生したものと推定された。

このように、掘削箇所が降下軽石層に近接し過ぎるとボーリング発生危険性があると考えられたため、内部侵食に対する安全性の点から、ルート妥当性についても検討を行った。図-8は、二次元FEM浸透流解析によって得られたトンネル掘削時の地下水位低下に伴って発生する流速を示している³⁾。この場合、トンネル断面と降下軽石層の最短距離は20mであり、発生する最大流速は降下軽石層で 2.7×10^{-3} cm/sである。この最大流速と、しらすの大型不攪乱試料を用いて実施した室内浸透実験結果⁴⁾（限界流速 3×10^{-2} cm/s以上）と対比すると、侵食崩壊に対する安全率は10以上となり、トンネルと降下軽石層の距離を20m以上とすれば安全性は確保できるものと判断した。なお、前述の開水路部における陥没問題に関しては、掘削底面に噴射攪拌工法によって遮水盤を打設し、間隙水圧計や単孔式地下水流向流速計による慎重な計測管理⁵⁾のもと無事に掘

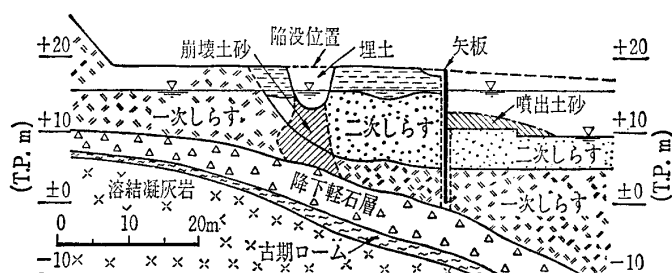


図-7 締切り部と陥没箇所間の地質断面図

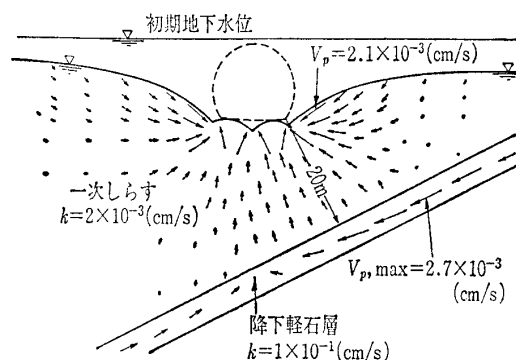


図-8 ウェルポイントによる地下水低下の浸透流解析結果

注 3) 従来から大間地域に分布する軽石流はこの名称で呼ばれてきた。しかし、これが鹿児島県内に普遍的にみられる入戸火砕流と同一であることから、今では「入戸火砕流」と記載される場合が多い。

削を完了した。

(2) 地下水対策工法について

小断面トンネル(断面積 10 m^2) による試験工事の結果、釜揚げ排水等の重力排水工法では、しらす層中の地下水は低下しにくく、切羽崩壊や支保工沈下が生じやすいことが判明した。したがって、本トンネルでは、ウェルポイント工法、ディープウェル工法等の地下水低下工法や、圧気工法、薬液注入工法、凍結工法等の止水工法について比較検討を行った。地下水低下工法のうち、ディープウェル工法は、広範囲の水位低下が困難なため、多数設置する必要があるが、効率が悪いことが試験掘坑において確認された。また、薬液注入工法は、懸濁型と溶液型の複合注入を行えば有効であることが試験掘トンネルにおいて確認されたが、注入率が70%にも達し、工費や工期の点で問題があると判断された。圧気工法は、トンネル上部に遮蔽層がないため大量の漏気が発生しやすく確実性に不安があること、また凍結工法は工費や工期のほかに、凍結膨張によってしらすの溶結効果が弱められ、侵食抵抗が半減する⁶⁾ という問題のあることが、各種調査・試験によって確認された。

そこで地下水対策工としては、試験掘トンネルにおいてその有効性が確認され、かつトンネル内から施工できるウェルポイント工法が、安全性、施工性、経済性の面から最も適していると判断した。なお、本トンネルのウェルポイント工法は、切羽斜め前方への打設となるため、通常用いられる型式とは異なる水抜きボーリングにバキューム効果を併用する形とし、また土砂吸出しを防止するためストレーナー部をステラシートにて保護している。図-9に、ウェルポイントの配置状況を示す。

前項で述べたように、本トンネルは降下軽石層との離れを20m以上確保できるような形でルートが決定された。しかし、下流側坑口付近の約175m区間においては、ルート線形および用地上の問題から、20m以下での降下軽石層との近接が避けられず、最短距離で5mという厳しい条件下での施工となる。そのため、この区間のみはトンネル両側の地下水位上に作業坑(幅、高さ約5mの馬蹄形トンネル)を設け、この作業坑より遮水のための地下連続壁を打設するという特殊な工法を採用した(図-10)。この地下連続壁は、小断面の作業坑内からの打設となること、連続壁打設長が最大50mとやや深く、かつ止水が目的のため高い鉛直精度が求められること、一部区間では軟岩掘削となる可

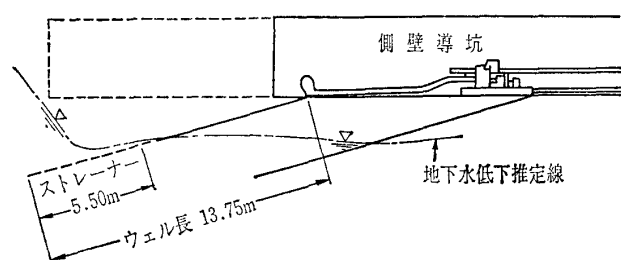


図-9 ウェルポイント配置図

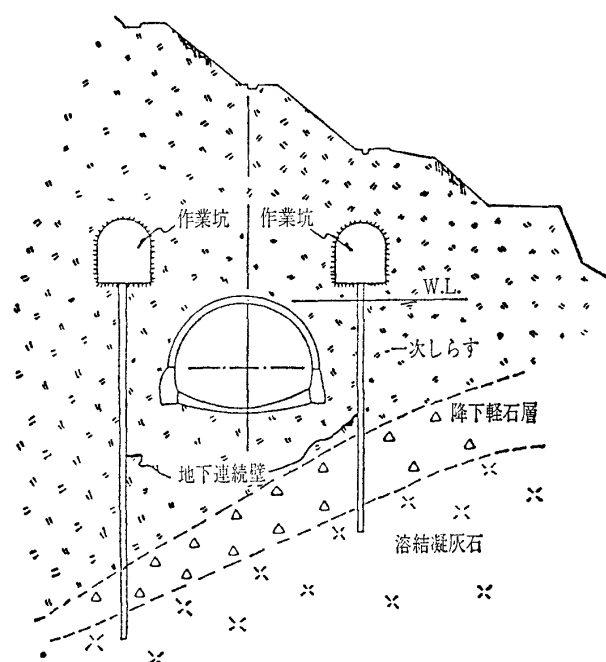


図-10 地下連続壁による降下軽石層の地下水遮断

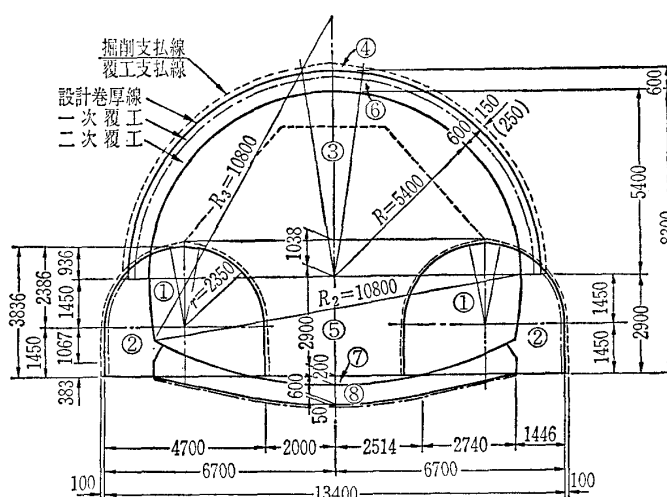


図-11 鹿屋分水路トンネル標準断面図

能性があること等の条件から、これらを満たし得る掘削機を用い、泥水固化方式にて打設することとした。この地下連続壁打設は、作業坑内での作業となるためエレメント間のロッキングパイプは用いず、先行エレメントに後行エレメントをオーバーラップさせる形としている。こうすることによって、エレメントの間の完全な接合は可能となるが、後行エレメント掘削時に泥水が劣化し、逸泥水や孔壁崩壊が生じやすくなる。そこで本工事では、泥水の分級・脱水両機能を持つ遠心分離機を用いることによって、泥水の劣化を防止することとした。

(3) トンネル完成後の地下水流動と内部侵食問題

本トンネルは、掘削時には地下水を低下させるが、トンネル完成後は、水文環境への影響を極力少なくするため、地下水位を復水させることとなっている。その場合、トンネル周辺に生じる地山の緩み領域や空隙を多量の地下水が

No. 1768

トンネル縦断方向に流動し、覆工と接しているしらす層が内部侵食を受けることが懸念された。

そのため掘削工法については、地山を緩ませず、かつ復水後に水みちとなるような空隙を生じさせないという観点から、しらす地盤という特性を考慮しつつ検討を行った。このことは、本トンネルが土被り約30mで市街地下を通過するため、大きな地表面沈下が許されないという点からも必要とされた。

地山の緩みや空隙発生防止の点では、掘削直後に地山に密着した吹付けコンクリートやロックボルトを打設する NATM 工法の方が、矢板工法に比べ有利と考えられる。しかし、吹付けコンクリートについては、地下水位下のしらすに対しての実績がなく、天端部での密着性にやや不安がある。またロックボルトについても、試験工事において施工性の悪いことが判明し、復水後に水みちとなる可能性が大きいと判断された。一方、木製矢板等を用いる通常の矢板工法では、地山と覆工の間に空隙が生じやすく、また地山の緩みも大きくなる可能性が強い。そこで本トンネルでは、NATM 工法における主要な支保部材である吹付けコンクリートやロックボルトは用いないが、緩み防止に対する NATM 工法の利点をとり入れるとともに、通常の矢板工法の欠点を補うため、掘削直後に地山と密着した直巻き覆工コンクリートを打設することとした。図-11にトンネルの標準断面図を示す。

この復水後の地下水流動問題については、施工中の計測によって地山の緩み状態をチェックするとともに、トンネル完成後にトンネル周辺の地下水流向流速を測定し、問題の有無を確認する予定である。

4. あとがき

これまで地下水位下のしらすを掘削対象としたトンネルは例がなかったため、適切な地下水対策工等については不明な点が多かった。今回報告した2例のトンネルから考えると、地下水対策工としては、ウェルポイント工法が極めて有効であることが判明し、今後一つの標準工法として用いることが可能と考えられる。

ただし、鹿屋分水路トンネルの例のように、高透水性の地層が関与している場合には、しらすの特殊性の一つである内部侵食問題の観点からの検討が重要である。また、トンネル完成後の地下水挙動についても、内部侵食の点から予測・検証しておく必要があるのも地下水位下しらすトンネルの大きな特徴と考えられる。

地下水位下しらすトンネルの問題点や対策についての研究は、緒に就いた段階であり、まだ多くの解明すべき点があるのが実情である。しらすといっても、軟質しらすから硬質しらすまで種々のものがあり、その種類に応じた問題点や対策工があることも考えられる。また、トンネル供用開始後の車両振動による地下水位下しらすの流動化の問題も全く未解明であり、今後の重要な検討課題である。これらの問題については、昭和62年12月より側壁導坑掘削が開始される鹿屋分水路トンネルや、昭和63年3月より供用が開始される山田トンネル、さらには現在進められつつある鹿児島新幹線のしらすトンネルの試験工事等において徐々に明らかにされるものと期待している。

最後に、本文をとりまとめるに当たり多大な御協力をいただいた鹿児島県道路公社の中畠恭昭氏、および建設省九州地方建設局大隅工事事務所の山根史郎氏に深く感謝する次第です。

参 考 文 献

- 1) 土質工学会編：日本の特殊土，土質工学会，1974.
- 2) 山内豊聡・林 重徳：しらすの限界流速と浸透崩壊問題への適用，日本応用地質学会昭和59年度研究発表会予稿集，pp. 140～143，1984.
- 3) 脇 秋吉ほか：しらすトンネルにおける浸透崩壊問題の解析，第3回日本応用地質学会九州支部研究発表会予稿集，pp. 67～70，1985.
- 4) 林 重徳・斉藤芳徳・松雪清人：乱さない一次しらすの浸透崩壊特性，第20回土質工学研究発表会講演集，pp. 1489～1490，1985.
- 5) 脇 秋吉ほか：地下水位下しらすの掘削における計測管理，第4回日本応用地質学会九州支部研究発表会予稿集，pp. 22～25，1986.
- 6) 林 重徳・斉藤芳徳・松雪清人：凍結した一次しらすの浸透崩壊特性，第21回土質工学研究発表会講演集，pp. 159～160，1986.

(原稿受理 1987.12.7)